

氏名・(本籍)	ア-リャワテイ ガ マ ゲ Ariyawathie Gamage ワトウガラ Wathugala
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理博第 933 号
学位授与年月日	昭 和 60 年 3 月 26 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程) 生物学専攻
学位論文題目	Studies on the biological control of water pollution using emerged plants. (抽水植物による水汚染の生物学的制禦に関する研究)
論文審査委員	(主査) 教 授 栗 原 康 教 授 飯 泉 茂 助教授 菊 地 永 祐

論 文 目 次

Chapter 1 Introduction

Chapter 2 Preliminary studies on making use of *Phragmites australis* for the removal of nitrogen, phosphorus and COD from the waste water.

2.1 Introduction

2.2 Materials and methods

2.3 Results

2.3.1 Organisms

2.3.2 Biomass and chlorophyll-a

2.3.3 Chemical analysis

2.3.4. Evapotranspiration

2.3.5 Total inputs and outputs of total nitrogen, total phosphorus and COD

2.4	Discussion
Chapter 3	Studies on the removals of nitrogen and phosphorus in relation to their concentrations in the influent media
3.1	Introduction
3.2	Materials and methods
3.3	Results
3.3.1	Growth and the total biomass of the plants
3.3.2	Chemical analysis
3.3.3	Evapotranspiration
3.3.4	Percentage removals of total nitrogen and phosphorus
3.4	Discussion
Chapter 4	Distribution of nitrogen and phosphorus in the pot systems at the end of the operation
4.1	Introduction
4.2	Materials and methods
4.3	Results
4.3.1	Amounts incorporated in the plants
4.3.2	Amounts retained in the sand
4.3.3	Distribution of total nitrogen and phosphorus in the pot systems
4.4	Discussion
Chapter 5	Studies on the removal of COD in relation to the concentrations in the influent media
5.1	Introduction
5.2	Materials and methods
5.3	Results and discussions
5.3.1	Chemical analysis of effluent waters
5.3.2	Removal rates of total nitrogen, total phosphorus and COD
5.3.3	Effects on the growth of plants, and the concentrations of nitrogen and phosphorus in the tissues
5.3.4	Distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in the sand
5.3.5	Distribution of carbon in the other fractions of the pot systems
Chapter 6	Seasonal changes in the biomass and the accumulations of nitrogen and phosphorus in the tissues of <i>Phragmites australis</i> growing in the waste water purification system
6.1	Introduction

6.2	Materials and methods
6.3	Results and discussions
6.3.1	Seasonal changes in the biomass
6.3.2	Seasonal changes in the concentrations and the contents of carbon, nitrogen and phosphorus in the tissues
6.3.3	The concentrations and the accumulations of nitrogen and phosphorus in the sand
Chapter 7	Studies on the removals of nitrogen and phosphorus by <i>Zizania latifolia</i> and <i>Typha latifolia</i>
7.1	Introduction
7.2	Materials and methods
7.3	Results
7.3.1	Chemical analysis of the effluent waters
7.3.2	Evapotranspiration
7.3.3	Removal rates of total nitrogen and phosphorus
7.3.4	The biomass and the contents of nitrogen and phosphorus in the plants
7.3.5	The distributions of total nitrogen and phosphorus in the pot system
7.4	Discussion
Chapter 8	Studies on the vertical distribution of nitrogen and phosphorus in the interstitial water and sand in the experimental pots
8.1	Introduction
8.2	Materials and methods
8.3	Results and discussions
Chapter 9	Effects of harvesting on regeneration, total production, and the amounts of nitrogen and phosphorus in <i>Phragmites australis</i> growing under field conditions
9.1	Introduction
9.2	Materials and methods
9.3	Results
9.3.1	Growth and production
9.3.2	Amounts of nitrogen and phosphorus
9.3.3	Recovery in the subsequent year
9.4	Discussion
Chapter 10	General discussions and conclusions
	Acknowledgments
	References

論文内容要旨

第1章

近年、都市および農業廃水による水域汚染の浄化に関して、高等水生植物を利用した生物学的制御手法が極めて注目されつつある。本研究においては、汚濁した汽水および淡水の河川や止水域に普通にみられる抽水植物であるヨシ(*Phragmites australis*)、マコモ(*Zizania latifolia*)、ガマ(*Typha latifolia*)が、N(チッ素)、P(リン)、COD(化学的酸素要求量)の除去に対してどのように貢献しうるかに関して実験的研究を行ない、かつそこから得られた知見を具体的な生物学的制御技術として位置づけるために野外研究も行なった。

実験装置としては河川砂を深さ35cm程に充填した大型ポットを用い、そこに抽水植物を移植し生育させた。また、有機汚濁液であるコーンステープリカーを希釈し、それに無機栄養塩を加えて所定のN、P、COD濃度に調整したものを、流入水として用いた。流入水は一定の滞留時間になるように連続的に上部より供給し、砂層を通過した後に底部より排出させるようにした。この場合、水深を20cmに維持した。上記システムにおいて、表層水、流出水を化学分析することによって、経過時にN、P、CODの除去能力を調べ、また、実験の最後には、除去されたN、Pがこのシステム内にどのように分布しているのかを調べることによって、抽水植物の環境浄化能力を評価した。以上のことから、植物体を収穫することによって、多量のN、Pを系外に除去できることが明らかになったので、N、P除去量をできるだけ大きくするための刈り取り回数と時期についても野外において調査研究した。

第2章

ヨシを植えたポット(Pポット)と植えないポット(コントロール:Cポット)に、活性汚泥法における2次処理水に相当する程度のN、P、COD濃度(全チッ素:TN=11.9mg/l、全リン:TP=1.3mg/l、COD=16.2mg/l)の流入水をかけ流し、除去能力を比較した結果、表層水ではN、Pともにヨシの存在する方がより高い能力を示したが、流出水ではヨシの有無にかかわらずN、Pはほとんど検出されなかった。また、COD除去に関してはPポットで83%、Cポットで86%であった。このことから、本研究で用いたシステムにおけるヨシの効用を明確にするためには、N、Pの流入負荷をもっと高くする必要のあることが示唆された。

第3章

流入水のCOD濃度は一定(16.2mg/l)のまま、N、P濃度は2章で用いたものの4、8、16、32倍にしたものをそれぞれPポットとCポットに流入させ、流出水を分析したところ、すべての流入水濃度においてヨシが存在することによって、N、P除去能力は高まっていた。さらにヨシが存在することで蒸発散量がより多くなることが確かめられたので、PポットのN、P除去能力は総除去量において、よりすぐれていることが判明した。この場合、負荷が高いと除去量も

高まるという傾向を示したが、除去率においては負荷が低いと高くなる傾向を示した。また、ヨシの成長および現存量は16倍の負荷を与えたもので最高であったことと、32倍の負荷のポットでは実験の終わりの方で流出水の水質が悪くなってきたことから、良好な処理水が得られ、ヨシの成長が良好でかつ最大の N, P 除去効率が得られるのは、流入水中の N, P 濃度が16倍のとき、すなわち TN と TP がそれぞれ198mg/ℓ と21mg/ℓ のときであることが判明した。

第4章

このシステムにおいて除去された N, P は、システム内に保存もしくは空中に逸散したと考えることができるので、システム内のどの部位が N, P の除去に最も寄与しているかを検討するために、実験の終わり(11月)に、システム内における N, P の分布を調べた。その結果、除去された N, P のうちかなりの部分が植物体と砂にあることが判明した。植物体中の N, P 濃度は、負荷が高い程高くなる傾向を示していたが、現存量が最大である16倍の負荷を与えたポットにおいて、最大の N, P 量が植物体として蓄積されていた。また、その70%以上が地上部(葉と茎)にあることから、ヨシを刈り取ることによって大量の N, P を系外に除去できることが示唆された。一方、砂中に吸着している N, P 量は、負荷が高くなるにつれて増大し、P ポットでは N, P 濃度は砂の上層部で高く下層部へいくに従って低くなるという勾配が認められたが、C ポットではこのような勾配は認められなかった。このことから、最上層部の砂を必要に応じて取り換えることによって長期間 N, P 除去能力を発揮しつづけることが期待された。砂中に吸着した P の総流入量に対する割合は、ヨシの存在する方のポットで高かったが、これはヨシが生育していることで砂中がより酸化的な状態に保たれるため、より多くの P が砂に吸着する結果と考えられた。総流入量から総流出量とポット内に保存されていた量を差し引いた残りは、空中へ失なわれたことを意味するが、N についてはこの値が P ポットの方が高かった。これはおそらく、ヨシの存在下で脱 N が促進されるためと思われる。

第5章

N, P 濃度は一定(TN=198mg/ℓ, TP=21mg/ℓ)にして、COD 濃度を21, 42, 85, 128mg/ℓ の4段階にした流入水を P ポットと C ポットに供給して COD 除去能力を比較した結果、すべての流入水濃度にわたって C ポットは85%以上、P ポットは92%以上の値を示した。また N, P 除去能力は、COD 負荷を高くすることによって影響を受けなかった。この場合、注目すべきことは、ヨシが128mg/ℓ という高濃度の COD 流入下においても十分に成長しえたことである。また実験期間中(154日間)に砂が目づまりをおこすこともなかった。

第6章

3章においてヨシの成長が最も良好であった流入水(TN=198mg/ℓ, TP=21mg/ℓ, COD=21mg/ℓ)をかけ流した条件下で、ヨシの各器官(葉, 茎, 地下茎, 根)の現存量, N, P 濃度の変

化を季節的に調べた結果、地上部の現存量は生育初期に急速に増加したが、地下部の急速な増加は生育後期でみられた。また、葉と茎の N、P 濃度は季節変化を示さなかったが、地下茎と根においては生育がすすむにつれて増加した。また、ポット当りの現存量や N、P 量の増加速度は、地上部では生育初期に、地下部では生育後期に高かった。

第 7 章

以上の研究から、ヨシを植えたポットはすぐれた浄化能力をもっていることが明らかとなったので、同じ抽水植物であるマコモとガマが、ヨシと同等の役割を果しうるかどうかを調べた。6 章と同じ流入水負荷を与えた結果、マコモ、ガマとともに N、P 除去に対して、ヨシと同様の効果をもっていることがわかった。この場合、植物体各器官の N、P 濃度と現存量の結果から、地上部を刈り取ることによって除去できる単位面積当りの N、P 量は、マコモ>ヨシ>ガマの順に大きいことが判明した。

第 8 章

7 章と同様の実験条件下で、砂中の間隙水の N、P 濃度の垂直分布の経時変化を P ポットと C ポットで測定した結果、C ポットでは、はじめ上層部でのみ高い値を示したが、時間の経過とともに下層部の値も高くなり、垂直分布はほぼ一様になった。一方 P ポットでは上層部で高く下層部に向かうにつれて著しく低下するという勾配を示しつづけた。また、実験終了時において、砂に吸着した N、P 量の垂直分布を調べた結果、P ポットにおける P の垂直分布が、砂中の根の現存量の垂直分布とそのパターンが一致したことから、ヨシの存在下で砂に吸着している P 量が極めて高い値を示すのは、根から放出される酸素による砂の酸化に起因しているものと考えられた。

第 9 章

植物体として蓄積される N、P は、刈り取ることによって系外に除去することができるが、その場合 N、P 除去量をできるだけ大きくするためにはどの時期に刈り取れば良いのかを知ることが必要である。野外(河口岸辺および淡水湿原)のヨシ原において刈り取り時期を変えた実験を行なった結果、植物体(葉と茎)中の N、P 濃度は生育初期で高く、その後減少するので、現存量のピークは8月初～中旬であるにもかかわらず、N のピークは7月中旬、P のピークは6月下旬～7月上旬であることが判明した。またヨシは一度刈り取った所から再び芽ばえかつ成長してくるので、11月にはそのヨシをも刈り取ることによって、一年間の総収穫量を求めると、N、P ともにその蓄積量がピークを示した時期に刈り取ることによって、大量の N、P を系外に除去しうることがわかった。それはピーク時の値に比べて N で15～22%、P で10～13%多く除去できることになる。また、刈り取った翌年におけるヨシの回復は、現存量で50～70%であったが、刈り取ったヨシ原の修復過程については更に年次を重ねた研究が必要であると思わ

れる。

第10章

砂ろ過システムにおける汚濁水浄化において、抽水植物が存在することは、植物体として多量の N, P を蓄積することと、砂中への酸素の放出を通じて、P の砂への吸着量を増加させるという点において大きな効果を生みだしており、また、野外の研究からも、抽水植物が水汚染の生物学的制御に関して重要な役割をにないことは明らかである。このように、砂ろ過システムに植物を組みこむことは、ひとつの新しい環境浄化システムとなりうることが期待される。その際、P の吸着量の大きい砂表層や、刈り取った植物体をコンポスト化したものは、農地に還元することによって生産に寄与させることができるものと思われるが、このような試みは浄化と生産を一体化して考える立場からも極めて重要であるといえよう。

論文審査の結果の要旨

近年、都市および農業廃水による汚染水界の浄化に関して、高等水生植物を利用した生物学的制御手法が注目されつつある。本論文は、汽水および淡水の河川、池、湿原にみられる抽水植物であるヨシ (*Phragmites australis*)、マコモ (*Zizania latifolia*)、ガマ (*Typha latifolia*) を利用して水界の N(チッ素)、P(リン)、COD(化学的酸素要求量)の除去をはかることを目的としたもので、そこから得られた知見を生物学的制御技術として統合することを目標としている。

そのために著者は、河川砂を深さ35cm程に充填した大型ポットに抽水植物を移植し生育させ、異なった N, P, COD 濃度の流入水を連続的に上部より供給し、砂層を通過した後に底部より排出させるという創意に満ちた実験装置を考案した。かかる装置において表層水、土壌間隙水、流出水を化学分析し、かつこれらのポット内における N, P の分布を調べることによって、N, P, COD の除去能力を調べ、次に流入水の TN と TP がそれぞれ198mg/l と21mg/l のときに最大の除去能力を有し、かつ植物体の現存量および植物体地上部(葉と莖)に蓄積される N, P 量が最大となることを明らかにした。また、植物体は根より酸素を放出することによって砂中、特に上層部を好氣的にし、多くの P を砂に吸着させるのに貢献していること、さらに植物体が存在することによって脱 N が促進されるという興味ある新知見を見出した。また著者は以上の結果を自然界において最大の N,P 取量を得るためのヨシ刈り取り時期の研究にまで発展させ、7月に刈り取ることの利点を明らかにした。

以上の結果はヨシ、マコモ、ガマ等の抽出植物が、N,P, COD 除去に対して大きく貢献していることを示すものであり、もし植物体を系外に除去し、砂上層部を必要に応じて取り換えるならば、この砂ろ過システムは、ひとつの新しい環境浄化システムと考えることができる。また、刈り取った植物体をコンポスト化して農地に還元し、農作物の生産に寄与させることができるならば、本研究は浄化と生産を一体化して考える立場からも極めて重要である。

著者の研究は、生態学および環境科学に対して重要な新事実を提供しているだけでなく、社会的にも重要な研究の基礎をなすものであり、この種の学問に対して貢献するところが大きいと考えられる。

以上のごとく、本論文は著者が自立して研究を行なうに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よってアーリャワティ・ガマゲ・ワトゥガラ提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。